第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度空间分布特征

赵 鹏[1,2], 朱淑娟[1], 段晓峰[2], 常兆丰[2], 康才周[1],
王方琳[2], 王昱淇[2], 高德才[3]

(1. 甘肃省治沙研究所甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室,甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃 民勤 733000; 3. 古浪县海子滩林场,甘肃 古浪 733100)

摘 要: 土壤粒度是风沙活动的重要表征参数。通过野外调查与室内测试,分析了不同空间分布防风固沙林表层土壤粒度的空间分布特征,旨在评价民勤绿洲边缘阻沙带防风固沙功能。结果表明:(1) 坝区梭梭-沙拐枣-沙蒿-沙米固沙林表层土壤粒度组成以细砂、中砂、极细砂为主,分别占33.47%、26.08%、18.18%;泉山区白刺+沙蒿+五星蒿固沙林表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主,分别占29.62%、21.17%、18.87%;湖区白刺-芦苇-猪毛菜固沙林表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主,分别占36.66%、27.98%、22.83%。(2) 平均粒径,坝区(2.55 Φ)>泉山区(3.5 Φ)>湖区(3.94 Φ),分选性,坝区(1.58 Φ)较差,湖区(2.10 Φ)和泉山区(2.29 Φ)很差。(3) 泉山区、湖区表层土壤粒度频率曲线为双峰型,坝区为单峰型,偏度均为极正偏态,峰度表现为很窄。粒度累计分布曲线反映出坝区风沙活动较泉山区、湖区频繁、强烈。阻沙带荒漠植被群落物种组成决定着其防风固沙功能的大小,进而影响其表层土壤的粒度分布特征。建议阻沙带生态防护体系修复时应注重选择固沙能力强的造林树种。

关键词: 阻沙带; 粒度特征; 固沙植被; 防风固沙功能; 民勤绿洲

作为一种由不同颗粒组成、具有不规则形状的多孔介质,土壤粒度分布不仅影响其水分运动、溶质运移、养分状况等诸多性质[1-4],而且与土地利用类型、地表覆被、沙漠化的发生发展及植被恢复密切相关[5-10]。土壤风蚀指风对地表土壤的侵蚀、搬运和堆积过程。当风速超过颗粒物的临界启动值时,颗粒物离开地表进入空气。土壤风蚀过程实质是风与地表土壤颗粒的相互作用过程。风蚀的发生与表层土壤粒度组成密切相关,表层土壤粒度特征决定其运动状态,最终决定风蚀强度[11]。各种原因引起的土壤风蚀是造成沙漠化发展中土壤过程的主要动力因素,严重影响着土壤的稳定与土壤细物质和养分的迁移[12]。亿利生态光伏电站不同立地条件的光伏电板阵列内沉积物特征表明,种植甘草可以使土壤细粒组分增多[13]。各规格PLA障内沉积物均以极细砂和细砂为主,其阻滞作用使得极细颗粒含量百分比迅速下降[14]。策勒沙丘表面沙物质平均粒径由粗到细为:砾质戈壁新月形沙丘、沙漠新月形沙丘、回涡沙丘、灌丛沙堆[15]。北部湾海滩沙与风沙的粒度特征呈现明显的区域性差异,底质以中沙为主的北海、棋子湾海滩沙与其上发育的风沙在粒度结构参数散点图上区分度更高[16]。阿联酋迪拜中部沙漠沙物质粒度特征表明沉积物以悬移和跃移质为主,环境低能且稳定。古沙丘全部为风成沉积,丘间平地多为洪流沉积,砂岩既有风成沉积也有水成沉积[17]。作为风力强度的代用指标,风成沙平均粒径可提取海岸风沙沉积记录的风力强度变化序列[18]。综上所述,土壤粒度分布特征被广泛用于指示风沙活动[19-21]、沉积环境及物源信息[22-24]。

我国绿洲主要分布于贺兰山以西地区,是西北大漠中的"绿岛"和"湿岛"。虽然面积不及西北干

收稿日期: 2021-04-02; **修订日期:** 2021-07-01
基金项目: 国家地区科学基金项目(41661064,41761051,41761006);甘肃省科技计划(19ZD2FH001-1,20JR5RA094,20JR5RA091);中央财政草原生态修复治理资金"民勤荒漠区人工草地建植技术研究与示范";甘肃省财政防沙治沙项目"微型压沙车在河西走廊风沙源治理中的推广应用"
作者简介: 赵鹏(1987-),博士,副研究员,主要从事荒漠化防治研究. E-mail: zhpg1987@sina.com
通讯作者: 朱淑娟. E-mail: 315153214@qq.com

旱区的4%，但它哺育了干旱区90%以上的人口，集中了98%以上的城镇。经过60多年的努力，在河西走廊绿洲边缘建立了长达1200多公里的大型阻沙固沙带，确保了绿洲免于流沙侵袭。近年来，受气候变化和人类活动的影响，大型阻沙固沙带呈现退化趋势，生物多样性减少，防风固沙效应减弱，部分地段沙丘活化，已成为新的沙尘源，流沙逼近农田，严重威胁着绿洲生态安全，制约着国家生态安全屏障北方防沙带的建设。阻沙带退化现象在石羊河下游的民勤绿洲尤为明显。为此，本论文以民勤绿洲为例，开展绿洲边缘大型阻沙带表层土壤粒度空间分布特征及其影响机制研究，以期为阻沙带防风固沙功能的科学评价与恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠东南缘的民勤阻沙带(102°54′47″~102°57′3"E，38°25′49″~38°37′41″N)，属于典型的温带大陆性荒漠气候。根据甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站近59 a(1961—2020年)的气象观测资料，当地多年平均气温 7.6 ℃，年均日较差 15.2 ℃；≥10 ℃积温为 3036.4 ℃，无霜期176 d；多年平均降水量为115.41 mm，主要集中在每年的7—9月，占年均总降水量的60%以上；多年平均水面蒸发量为2664.00 mm，蒸发量是降雨量的23倍。西北风为主导风向，年平均风速2.5 $m\cdot s^{-1}$，年平均大风日数25.1 d，年平均沙尘暴日数25.6 d，年≥8级大风日数为27.8 d。区域地表覆盖类型有自然植被、人工植被、荒漠景观、裸地、人工绿洲、固定沙丘和半固定沙丘等。荒漠植被特征明显，群落片层结构简单，以灌木、半灌木旱生群落和1 a生草本“灌草丛”为主[25]。人工植物有梭梭(*Holoxylon ammodendron*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、新疆杨(*Populus alba*)、二白杨(*Popolus gansuensis*)；天然植物有唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)、蒙古沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙蒿(*Artemisia arenaria*)、多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、芦苇(*Phragmites australis*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等。地带性土壤为灰棕漠土、非地带性土壤为风沙土、草甸土和草甸沼泽土，灌淤土是最主要的耕作土壤。

1.2 野外调查取样

按照地下水埋深的时空特征民勤绿洲可划分为坝区、泉山区和湖区[26]。在民勤坝区、泉山区、湖区沿绿洲至荒漠的方向共设置9条阻沙带观测样带，每条样带间隔500 m设置1个样地，共调查72个样地(图1，表1)。在调查样地，随机取0~5 cm层3个土壤样品混合均匀后带回实验室，风干后过2 mm筛去除砾石和其他杂物，利用Mastersizer 2000激光粒度分析仪湿法进样法测定土壤粒度组成。不同空间分布阻沙带表层土壤均为风沙土。前处理理方法为：根据土质称取一定量土样(黏土约为0.1 g，砂土约为0.3 g)，加10 mL 10% H_2O_2，加热煮沸至不再产生气泡，以去除有机质和易氧化盐类物质；待烧杯冷却后，加入10 mL 10%的盐酸后摇匀低温消煮，去除钙盐，加蒸馏水静置12 h以上；加10%的六偏磷酸钠10 mL至样品中，用超声波分散30 s，进行粒径测定。

1.3 土壤粒度参数

土壤粒径分级标准采用美国制，将土壤颗粒组分划分为砾石(＞2.0 mm)、极粗砂(1.0~2.0 mm)、粗砂(0.5~1.0 mm)、中砂(0. 25~0.5 mm)、细砂(0.1~0.25 mm)、极细砂(0. 05~0.1 mm)、粉粒(0.002~0.05

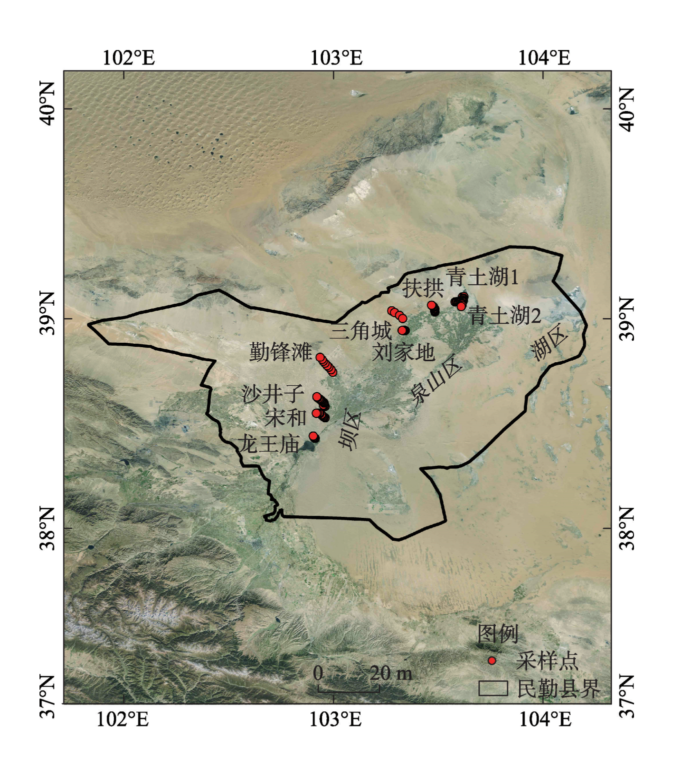


图1 调查样地分布示意图

Fig. 1 Distribution of survey plots in edge of Minqin Oasis

表1 民勤绿洲边缘典型阻沙带概况

Tab. 1 The general situation of sand barrier zone on the edge of Minqin Oasis

区域	样带名称	群丛类型	土壤类型	微地貌
坝区	龙王庙	沙拐枣-沙蒿-沙米	风沙土	半固定沙丘
	宋和	梭梭+沙拐枣-五星蒿	风沙土	半固定沙丘
	沙井子	白刺+梭梭-沙米	风沙土	半固定沙丘
泉山区	勤锋滩	梭梭+白刺-沙蒿	风沙土	灌丛沙堆
	刘家地	柽柳+白刺+红砂	风沙土	灌丛沙堆
	三角城	白刺+红砂-猪毛菜	风沙土	灌丛沙堆
湖区	扶拱	梭梭+白刺-黄花矶松	风沙土	半固定沙丘
	青土湖1	白刺+黑果枸杞-芦苇	湖相沉积物	灌丛沙堆
	青土湖2	白刺+盐爪爪-盐生草	湖相沉积物	灌丛沙堆

mm)和黏粒(<0.002 mm),并采用Folk等[27]提出的公式,借助GRADISTATv 9.1粒度处理软件计算平均粒径、分选系数、偏度和峰度等粒度参数。参数计算公式及其意义如下:

$$平均粒径:\bar{x}_a = \frac{\sum fm_m}{100} \quad (1)$$

式中:f表示频率百分比;m_m是长度制土壤颗粒粒径中值,物理意义是粒径大于它的颗粒占50%,小于它的颗粒也占50%,也叫中值粒径。土壤粒径的平均值表示颗粒的平均粗细大小,代表搬运作用营力的平均动能,颗粒大小反映土壤发育程度和物质来源。

$$分选系数:\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum f\left(m_m - \bar{x}_a\right)^2}{100}} \quad (2)$$

土壤分选系数表示沉积物的分选性。当$\sigma_a <$ 0.35 Φ时,分选极好;σ_a在0.35~0.50 Φ时,分选很好;σ_a在0.50~0.71 Φ时,分选较好;σ_a在0.71~1.00 Φ时,分选中等;σ_a在1.00~2.00 Φ时,分选较差;σ_a在2.00~4.00 Φ时,分选很差;σ_a >4.00 Φ时,分选极差。

$$偏度:SK_a = \frac{\sum f\left(m_m - \bar{x}_a\right)^3}{100\sigma_a^3} \quad (3)$$

偏度是表示沉积物粗细分布对称的一个定量描述指标,反映粒度分布曲线中主峰的大致位置和平均粒径与中值粒径的相对位置,以及土壤粒径的大小趋势。若为负偏时,称分布具粒径向中值粒径的较粗方向移动;正偏时,称分布具有正偏离,也称右偏态。此时主峰位于均值左边,即主峰在粗的一端,直观表现为平均粒径向中值粒径的较细方向移动。当SK_a介于−1.0~−0.3时,极负偏;SK_a介于−0.3~−0.1时,负偏;SK_a介于−0.1~0.1时,近对称;SK_a介于0.1~0.3时,正偏;SK_a介于0.3~1.0时,极正偏。

$$峰度:K_a = \frac{\sum f\left(m_m - x_a\right)^4}{100\sigma_a^4} \quad (4)$$

表示沉积物频度曲线的峰凸程度。当K_a<0.67时,很宽;K_a介于0.67~0.90时,宽;K_a介于0.90~1.11时,中等;K_a介于1.11~1.50时,窄;K_a介于1.50~3.00时,很窄;K_a>3.00时,非常窄。

1.4 沉积环境判别

Sahu[28]建立了基于粒度参数的沉积物环境经验判别公式,根据大量碎屑沉积物的粒度统计分析资料,求出在不同沉积环境下沉积物的平均粒径(M_z)、标准偏差(σ)、偏度(SK_a)、峰态(K_a)的变化特征,运用多元类别分析方法,建立了经验判别公式用于区分诸如沙丘沙、海滩沙、河流沙等。具体如下:

$Y1 = -3.5688M_z + 3.7016\sigma^2 - 2.0766SK_a + 3.1135K_a$

Y1<−2.7411判定为风成沉积,否则继续Y2;

$Y2 = 15.6534M_z + 65.7091\sigma^2 + 18.1071SK_a + 18.5043K_a$

Y2<65.3650判定为海滩沉积,否则继续Y3;

$Y3 = 0.2852M_z - 8.7604\sigma^2 - 4.8932SK_a + 0.0482K_a$

Y3>−7.4190判定为浅海沉积,否则继续Y4;

$Y4 = 0.7215M_z - 0.4030\sigma^2 + 6.7SK_a + 0.0482K_a$

Y4<9.8433判定为浊流沉积,否则为河流沉积。

2 结果分析

2.1 土壤粒度组成特征

民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤粒度组成

表2 民勤绿洲边缘阻沙带表层土壤粒度组成

Tab. 2 Grain-size composition of surface soil in the marginal sand barrier zone of Minqin oasis /%

区域	黏粒 < 0.002 mm	粉粒 0.002~0.05 mm	极细砂 0.05~0.1 mm	细砂 0.1~0.25 mm	中砂 0.25~0.5 mm	粗砂 0.5~1.0 mm	极粗砂 1.0 ~ 2.0 mm
坝区	2.16±1.6	12.46±12.54	18.18±8.42	33.47±9.86	26.08±12.73	7.42±7.00	0.23±0.72
泉山区	4.25±3.39	21.17±18.76	18.87±9.97	29.62±14.49	17.51±10.00	7.56±10.18	1.02±2.76
湖区	4.16±3.89	27.98±25.08	22.83±8.93	36.66±21.01	8.30±7.33	0.07±0.22	0±0

见表2,坝区阻沙带固沙林表层土壤粒度组成以细砂、中砂、极细砂为主,分别占33.47%、26.08%、18.18%;泉山区阻沙带固沙林表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主,分别占29.62%、21.17%、18.87%,;湖区阻沙带固沙林表层土壤粒度组成以细砂、粉粒和极细砂为主,分别占36.66%、27.98%、22.83%。细砂为优势粒级,细砂、极细砂和粉粒含量湖区(87.47%)>泉山区(69.66%)>坝区(66.11%)。黏粒含量泉山区(4.25%)>湖区(4.16%)>坝区(2.16%)。中砂、粗砂、极粗砂含量坝区(33.73%)>泉山区(26.09%)>湖区(8.37%),反映出坝区阻沙带固沙林表层土壤粗化明显。

2.2 土壤粒度参数特征

民勤绿洲边缘不同空间阻沙带固沙林表层土壤平均粒径 M_z 介于1.42~6.85 Φ,分选系数 σ、偏度 SK、峰度 K 分别介于0.57~3.10 Φ、-0.24~0.62 Φ、069~2.64 Φ(图2~图6)。坝区龙王庙阻沙带沙拐枣-沙蒿-沙米群落表层土壤平均粒径为2.53 Φ,粒度频率曲线为单峰型,分选性较差,偏度以正偏为主,峰度表现为很窄。宋和阻沙带梭梭-沙拐枣-五星蒿固沙林表层土壤平均粒径为2.45 Φ,粒度频率曲线为单峰型,分选性以较差为主,偏度以正偏和极正偏为主,峰度表现为很窄。沙井子阻沙带白

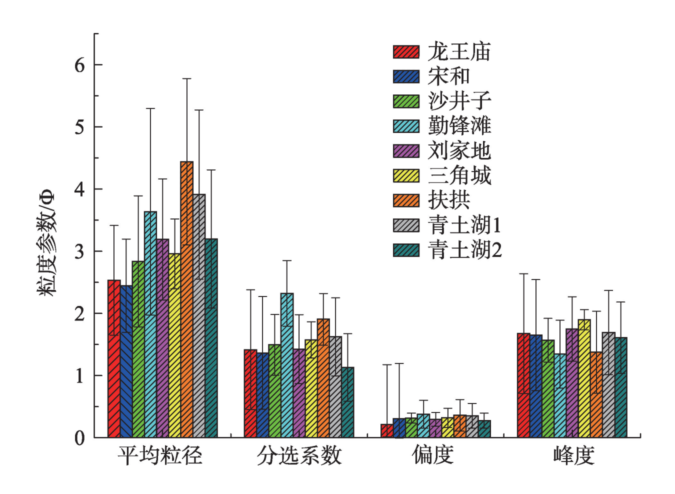


图2 民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤粒度参数

Fig. 2 Grain-size parameters in the surface soil of different sand-resitant belt in edge of Minqin Oasis

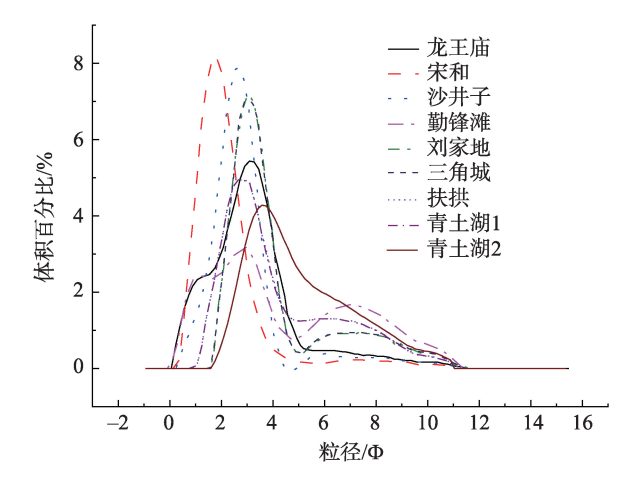


图3 民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤粒径频率分布

Fig. 3 Frequency curves of in the surface soil of different sand-resitant belt in edge of Minqin Oasis the surface soil at different sand-resitant belt

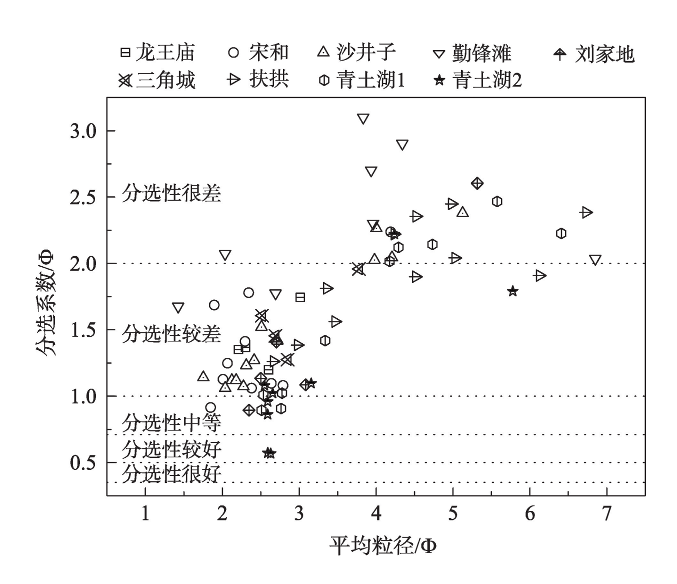


图4 民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤分选系数和平均粒径的关系

Fig. 4 Relationship between sorting coefficient and average particle size of the surface soil at different sand-resitant belt in edge of Minqin Oaiss

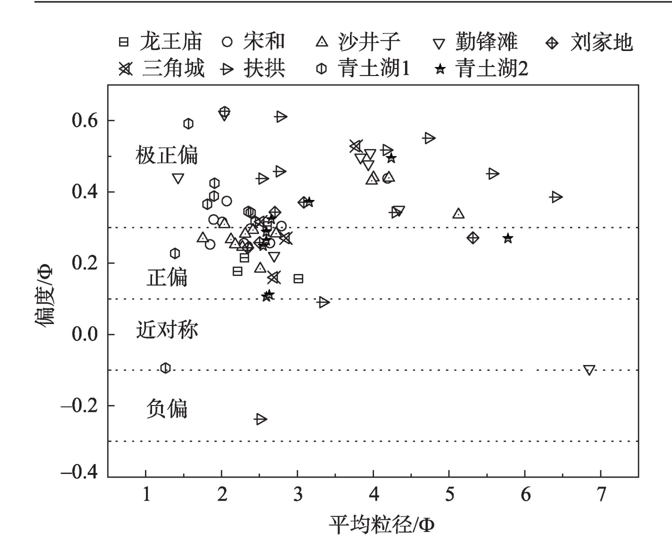


图5　民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤偏度和平均粒径的关系

Fig. 5　Relationship between skewness of frequency curves and average particle size of the surface soil at different sand-resitant belt in edge of Minqin Oasis

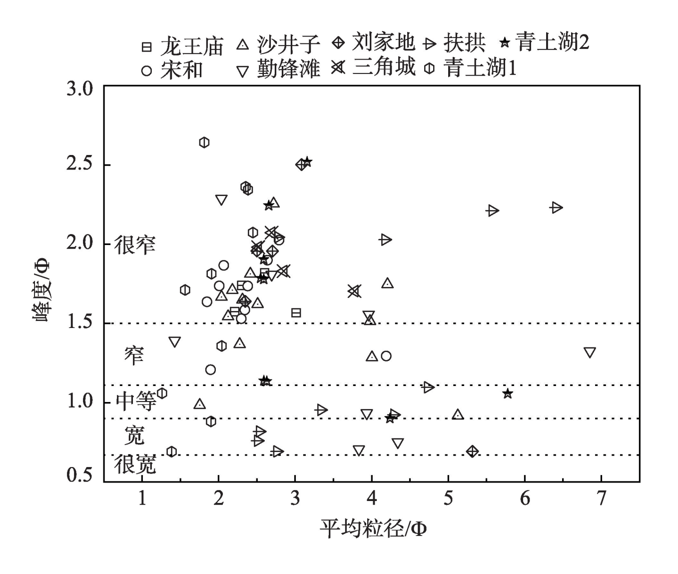


图6　民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤粒度频率曲线峰度和平均粒径的关系

Fig. 6　Relationship between kurtosis of frequency curves and average particle size of the surface soil at different sand-resitant belt in edge of Minqin Oasis

刺+梭梭–沙米固沙林表层土壤平均粒径为2.84 Φ,粒度频率曲线为双峰型,分选性以较差和很差为主,偏度以正偏和极正偏为主,峰度表现为很窄。坝区3条阻沙带固沙林表层粒度频率曲线以正偏单峰型为主,峰度很窄,分选性较差。

泉山区勤锋滩阻沙带梭梭+白刺–沙蒿固沙林表层土壤平均粒径为3.63 Φ,粒度频率曲线为双峰型,分选性很差,偏度以正偏为主,峰度表现为窄。刘家地阻沙带柽柳+白刺+红砂固沙林表层土壤平均粒径为3.19 Φ,粒度频率曲线为双峰型,分选性中等,偏度以正对称为主,峰度表现为很窄。三角城阻沙带白刺+红砂–猪毛菜固沙林表层土壤平均粒径为2.96 Φ,粒度频率曲线为双峰型,分选性较差,偏度以极正偏为主,峰度表现为很窄。整体上,泉山区阻沙带表层土壤粒度频率曲线以正偏双峰型为主,峰度很窄,分选性较差。

湖区扶拱阻沙带梭梭+白刺–黄花矶松固沙林表层土壤平均粒径为4.44 Φ,粒度频率曲线为单峰型,分选性较差,偏度以正偏为主,峰度表现为窄。青土湖1阻沙带白刺+黑果枸杞–芦苇固沙林表层土壤平均粒径为3.91 Φ,粒度频率曲线为双峰型,分选性中等,偏度以极正偏为主,峰度表现为很窄。青土湖2阻沙带白刺+盐爪爪–盐生草固沙林表层土壤平均粒径为3.19 Φ,粒度频率曲线为单峰型,分选性较差,偏度近对称,峰度表现为很窄。整体上,湖区阻沙带表层土壤粒度频率曲线以正偏单峰型为主,峰度很窄,分选性较差。

2.3　土壤粒度累计分布特征

土壤颗粒的累计频率曲线可以反映出土壤碎屑的搬运介质和动力条件,也可以反映砂粒的分选性,曲线愈陡直,说明分选越好,风沙活动愈频繁、愈强烈[29]。民勤绿洲边缘不同空间分布阻沙带土壤粒度分布的累计频率曲线如图7所示,坝区阻沙带表层土壤颗粒3种运动形式蠕移质、跃移质、悬移质的占比分别为8%、79%、13%,泉山区阻沙带蠕移质、跃移质、悬移质的占比分别为12%、68%、20%,湖区阻沙带蠕移质、跃移质、悬移质的占比分别为8.45%、61.55%、30%。3个区域中,泉山区阻沙带蠕移质占比最大,跃移质坝区占比最大,湖区阻沙带悬移质占比最大。坝区阻沙带表层土壤粒度频率分布曲线最陡直,其次是泉山区和湖区。根据曲线的陡直情况可知,坝区风沙活动较泉山区、湖区频繁、强烈。

2.4　沉积物环境判别

在流水作用下,祁连山风化产生的碎屑物质在山前形成冲洪积扇,在河湖周边形成冲积平原(河流堆积物)。随着晚新生代中国西北干旱化程度的不断加剧,亚洲中部大量尾闾湖萎缩甚至干涸,而大气

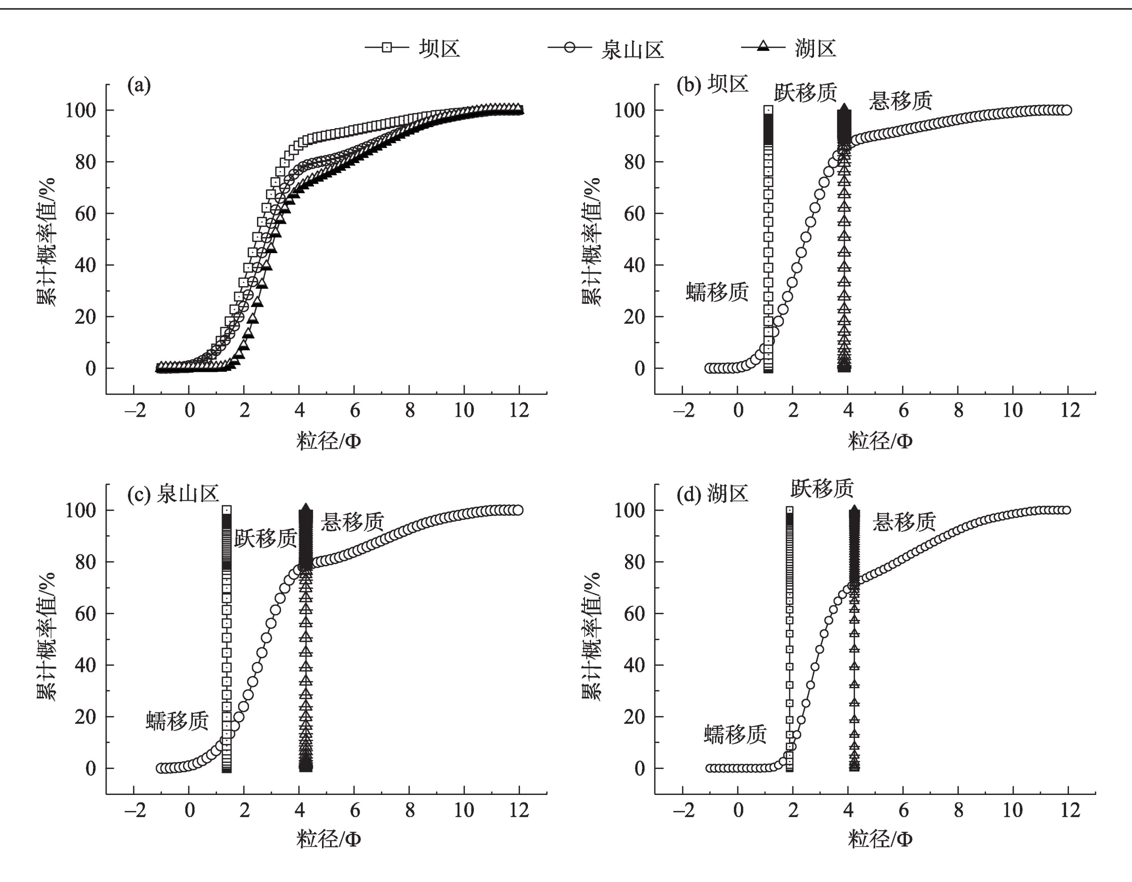


图7　民勤绿洲边缘不同阻沙带表层土壤累计频率

Fig. 7　The log-probablity cumulative curves of grain-size distribution of surface soil in typical sand-resitant belt in edge of Minqin Oasis

表3　民勤绿洲边缘不同空间阻沙带沉积环境判别结果表

Tab. 3　Discriminating results of different Spatial sand barriers sedimentary environments on the edge of Minqin Oasis

区域	参数				沉积环境
	*Y*1	*Y*2	*Y*3	*Y*4	
龙王庙	3.302961	208.8232	−18.1516	11.30424	河流沉积
宋和	3.243269	206.9248	−18.3915	11.75447	河流沉积
治沙站	3.038087	244.6358	−22.7737	11.05928	河流沉积
勤锋滩	11.27018	458.5144	−50.0603	10.0111	河流沉积
刘家地	2.346301	245.7138	−21.5277	12.59295	河流沉积
三角城	4.086655	254.084	−22.8754	13.29691	河流沉积
扶拱	1.710394	350.2823	−33.6047	11.38533	河流沉积
青土湖1	1.645367	295.3614	−26.7169	12.95729	河流沉积
青土湖2	−1.27886	185.949	−13.8453	12.04726	河流沉积

环流使得下游冲积平原和尾闾湖的松散堆积物受到侵蚀，风蚀地貌大量发育，且在下风向地区形成巨厚的风成堆积[30]。民勤绿洲位于石羊河下游，不同空间分布阻沙带表层土壤均为河流沉积（表3），与实际风成沉积不相符。研究表明，萨胡判别公式对青藏高原风成沉积，尤其是风成砂环境判别时，还存在局限性[31]。

3　讨 论

3.1　土壤粒度与植被的关系

作为地理环境的重要组成部分，植物强烈影响着大气圈与土壤圈之间的能量转换与传递，是土壤风蚀最活跃的影响因素之一。风蚀率随植被覆盖

度的减少呈指数增加，植被盖度大于60%为轻度风蚀，20%~60%为中度风蚀，小于20%为强烈风蚀。植被对土壤风蚀的影响取决于植被层的特征，可反映在地表粗糙度及风蚀强度的变化上[32]。塔里木河中下游湿地不同土地类型和植被类型及盖度对土壤粒度特征的影响明显[33]。由于植被覆盖及根系密度的降低，内蒙古典型草原过度放牧草地土壤表现出明显的风蚀特征，表层土壤粗粒化明显，土壤颗粒粗化直接引起土壤有机碳含量的下降[20]。毛乌素沙地生物结皮发育过程中，土壤黏粒、粉粒等细粒物质不断增加；粒度组成不断优化，整体呈现向均匀和对称分布演化趋势[34]。土地利用类型从草地到沙丘的演化是一个主要以极细砂+粉砂质量分数减少的风蚀荒漠化过程[35]。单位面积上防风固沙功能的排序为：白刺>沙蒿>梭梭>膜果麻黄[36]。灌丛的冠幅越大，越有利于细砂、极细砂和粉砂的截留[37]。本研究发现坝区梭梭-沙拐枣-沙蒿-沙米固沙林表层土壤易风蚀的土壤黏粒、粉粒(2.16%、12.46%)远小于泉山区白刺-沙蒿+五星蒿固沙林(4.25%、21.17%)和湖区白刺-芦苇-猪毛菜固沙林(4.16%、21.98%)。与人工梭梭林相比，灌丛沙堆具有较优良的防风固沙功能。

阻沙带表层土壤分选系数，坝区(1.58 Φ)>湖区(2.10 Φ)>泉山区(2.29 Φ)，分选性整体上较差，体现了阻沙带植被的防风阻沙作用。不同树种固沙林降低风沙流流量和减少风蚀深度的效应均表现为30 a生梭梭林>柽柳林>40 a生梭梭林>20 a生梭梭林>白刺>裸沙地[38-39]。民勤绿洲荒漠过渡带不同下垫面土壤风蚀的研究表明，风在草方格固沙带的搬运能力最弱，白刺灌丛沙包带其次，再次为芦苇荒漠带，在沙丘顶部的搬运能力最强，输沙量最大[40]。在沙漠区，通过1 m(宽)×50 m(高)的空间断面的年沙尘水平通量是9169 kg，沙漠绿洲过渡带通过相同大小断面的沙尘水平通量是5318 kg，比沙漠区减少了42%；绿洲内部相同断面的沙尘水平通量为2345 kg，比沙漠区减少了74%，证明防风固沙林和农田防护林网对沙尘暴有较强的消弱功能[41]。由此可见，固沙林的防风固沙效应取决于树种构型、林龄及配置模式。不同区域阻沙带荒漠植被群落物种组成决定着其防风固沙功能的大小，进而影响其表层土壤的粒度分布特征。

3.2　粒度与物源的关系

不同沉积物的粒径分布曲线可反映沉积物的物质来源情况。河西走廊“狭管”地形是民勤沙尘暴之所以多发的重要原因，民勤周边的小型“狭管”地形又使得民勤成为走廊中沙尘暴最为严重的区域[42]。石羊河中游地区的沉积相体现了从河流相到湖相再到风成沉积物的变化过程，指示了全新世的干旱化过程[43]。本研究发现石羊河下游民勤绿洲边缘均是河流沉积，与实际风成沉积不相符，反映了萨胡公式在内陆地区风成环境判别的局限性。坝区阻沙带固沙林表层粒度频率曲线几乎呈对称分布，峰型尖窄，细颗粒部分有尾部体现了风相沉积物的粒度特征。坝区跃移质粒径范围为1.124~3.88 Φ，远大于泉山区(1.374~4.245 Φ)和湖区(1.895~4.248 Φ)，体现了坝区相对高能的沉积环境。湖区阻沙带湖相沉积物表层土壤粒度频率曲线以正偏为主，峰型宽矮，双峰明显，细颗粒物质较风沙沉积物高。坝区、湖区表层土壤粒度频率曲线特征与乌兰布和沙漠、浑善达克沙地风成沙与湖积物粒度曲线特征相似[44]。灌丛沙地粒径频率曲线呈单峰态分布，而戈壁粒径频率曲线呈双峰或三峰态分布[45]。与前述结论一致，泉山区白刺灌丛的粒径分布以正偏双峰型为主，呈现了戈壁植被的特征。塔克拉玛干沙漠边缘农田(绿洲、林带区)草甸土粉砂和黏粒累计含量(50%~80%)远高于戈壁荒漠区(20%~30%)砂质土和砂壤土，地表粉细砂和细砂的粉尘释放量最大，中砂、粗砂次之，极粗砂最少[46]。坝区阻沙带土壤黏粒+粉粒(14.62%)远小于泉山区(25.42%)和湖区(26.14%)，暗示了泉山、湖区的粉尘释放潜力较大。民勤绿洲边缘坝区、泉山区、湖区不同空间分布阻沙带的粒度分布曲线差异明显，这种差异与沙漠物源的复杂性、沉积环境形成机制以及多样的沙物质迁移密切相关。

4　结 论

阻沙带表层土壤粒度组成，坝区以细砂、中砂、极细砂为主，分别占33.47%、26.08%、18.18%；泉山区以细砂、粉粒和极细砂为主，分别占29.62%、21.17%、18.87%；湖区以细砂、粉粒和极细砂为主，分别占36.66%、27.98%、22.83%。平均粒径，坝区

(2.55 Φ)>泉山区(3.5 Φ)>湖区(3.94 Φ)。分选性，坝区(1.58 Φ)较差，湖区(2.10 Φ)和泉山区(2.29 Φ)很差。泉山区、湖区表层土壤粒度频率曲线为双峰型，坝区为单峰型，偏度均为极正偏态，峰度表现为很窄。粒度累计分布曲线反映出坝区风沙活动较泉山区、湖区频繁、强烈。阻沙带荒漠植被群落物种组成决定着其防风固沙功能的大小，进而影响其表层土壤的粒度分布特征。建议阻沙带生态防护体系修复时应注重选择固沙能力强的造林树种。

参考文献(References):

[1] Hwang S I, Powers S E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1103–1112.

[2] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 等 黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 608–618. [Zhang Junhua, Li Guodong, Nan Zhongren, et al. Research on soil particle distribution and its relationship with soil organic carbon under the effects of tillage in the Heihe oasis[J]. Geographcial Research, 2012, 31(4): 608–618.]

[3] Mohammadi M H, Meskini- Vishkaee F. Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data [J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 70–80.

[4] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J]. 生态学报, 2012, (16): 4981–4992. [Li Haidong, Shen Weishou, Zou Changxin, et al. Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan wide valley of the Yalung Zangbo River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4981–4992.]

[5] 陈影影, 张振克, 徐华夏, 等. 沿海不同年限围垦区土壤剖面有机碳同位素与粒度特征——以江苏省东台市为例[J]. 地理科学, 2015, 35(6): 782–789. [Chen Yingying, Zhang Zhenke, Xu Huaxia, et al. Stable carbon isotope and particle size characteristics in coastal saline soil with different reclamation age of Dongtai, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(6): 608–618.]

[6] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 塔里木盆地南缘绿洲农田土壤粒径分布分形特征及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 730–735. [Gui Dongwei, Lei Jiangqiang, Zeng Fangjiang, et al. Fractal dimension of partical size distribution and its affecting factors in oasis farmland soils in southern marginal zones of Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 730–735.]

[7] 王忠臣, 钱亦兵, 张海燕, 等. 东天山喀尔里克山北坡淖毛湖盆地土壤粒度分布特征及成因[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 1035–1043. [Wang Zhongcheng, Qian Yibing, Zhang Haiyan, et al. Size distribution and origin of the soils on the north slopes of Karlik mountains-Nom basin in the Tianshan mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 1035–1043.]

[8] 周欣, 左小安, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地沙丘固定过程中植物生物量及土壤特性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 81–89. [Zhou Xin, Zuo Xiao'an, Zhao Xueyong, et al. Plant biomass and soil properties during the process of dune restoration in the Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 81–89.]

[9] 田丽慧, 张登山, 彭吉平, 等. 高寒沙地人工植被恢复区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 32–39. [Tian Lihui, Zhang Dengshan, Peng Jiping, et al. Grain size of land surface deposits in a vagetation restoration region of the alpine sandy land in Qinghai, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1):32–39.]

[10] 贾萌萌, 张忠良, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤粒径分布的分形特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 674–679. [Jia Mengmeng, Zhang Zhongliang, Lei Jiaqiang, et al. Fractal characteristics of soil particle distribution in protection forest of Tarim desert highway[J]. Arid Zone Reaearch, 2015, 32(4): 674–679.]

[11] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 3–5. [Dong Zhibao, Li Zhenshan. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by grain-size parameters[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(4): 3–5.]

[12] 刘树林, 王涛, 屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 611–616. [Liu Shulin, Wang Tao, Qu Jianjun. Soil characteristics changes in desertification process in Hunshandake sandy land, northern China [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4): 611–616.]

[13] 杨世荣, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 库布齐沙漠生态光伏电站不同覆盖类型下土壤粒度特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 112–118. [Yang Shirong, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Grain size characteristics of surface sediments of eco-photovoltaic power station in Kubuqi Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 112–118.]

[14] 王艺钊, 原伟杰, 丁国栋, 等. 聚乳酸(PLA)沙障凹曲面及沉积物粒度特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 671–678. [Wang Yizhao, Yuan Weijie, Ding Guodong, et al. Concave surface and grain- size characteristics in polylactic acid sand barrier[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 671–678.]

[15] 苏松领, 毛东雷, 蔡富艳, 等. 新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 124–132. [Su Songling, Mao Donglei, Cai Fuyan, et al. Grain- size characteriatics and sedimentary environment of sedients on the surfaces of crescent- shaped dunes in the desert and gravel Gobi in Cele, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 124–132.]

[16] 司月君, 李保生, 李志文, 等. 北部湾海岸现代风沙与海滩沙粒度特征对比[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 1–10. [Si Yuejun, Li Baosheng, Li Zhiwen, et al. A comparative analysis of grain size

characteristics of modern aeolian sand and beach sand from the coast od Beibu Gulf in China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 1-10.]

[17] 马茜茜, 谢小松, 肖建华, 等. 阿联酋迪拜中部沙漠沉积物粒度特征及其沉积环境分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34 (11): 104-109. [Ma Qianqian, Xie Xiaosong, Xiao Jianhua, et al. Analysis of grain-size characteristics and sedimentary environment of sediments in central Dubai, United Arab Emirates[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment. 2020, 34 (11): 104-109.]

[18] 李志星, 李志忠, 靳建辉, 等. 河北昌黎海岸沙丘粒度参数特征的风沙环境意义[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2020, 33 (1): 92-102. [Li Zhixing, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. The significance of aeolian environment reflectsd by particle size paramaters of coastal dunes in Changli, Hebei province[J]. Journal of Hainan Normal University(Nature Science Edition), 2020, 33(1): 92-102.]

[19] 周丹丹, 董建林, 高永, 等. 巴音温都尔沙漠表层土壤粒度特征及风蚀量估算[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 933-939. [Zhoug Dandan, Dong Jianlin, Gao Yong, et al. Grain size analysis and soil loss of surface soil during desertification process on Bayinwenduer desert[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 933-939.]

[20] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263-1268. [Yan Yuchun, Tang Haiping, Zhang Xinshi, et al. A probe into grassland wind erosion based on the analysis of soil particle size[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1263-1268.]

[21] 张正偲, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86-89. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. The effect of wind erosion on the surface particle size[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(12): 86-89.]

[22] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比——红粘土风成成因的新证据[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 61-67. [Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 61-67.]

[23] 乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 中新世黄土-古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2006, 36(7): 646-653. [Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen, et al. Grain-size characteristics of the Miocene loess-palaeosol sequence and their implications for genesis[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(7): 646-653.]

[24] 杨用钊, 李福春, 曹志洪, 等. 昆山绰墩古土壤粒度特征及母质判别[J]. 土壤通报, 2007, 44(1): 1-5. [Yang Yongzhao, Li Fuchun, Cao Zhihong, et al. Particle-size features of Chunodun Paleosol and identification of its parent material[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 44(1): 1-5.]

[25] 刘虎俊, 王继和, 常兆丰. 石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 113-118. [Liu Hujun, Wang Jihe, Chang Zhaofeng, et al. Characteristics of desert flora and vegetation in lower reach of Shiyang River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 113-118.]

[26] 李小玉, 宋冬梅, 肖笃宁. 石羊河下游民勤绿洲地下水矿化度的时空变异[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 319-327. [Li Xiaoyu, Song Dongmei, Xiao Duning. The variability of groundwater mineralization in Minqin Oasis[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 319-327.]

[27] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1) :3-26.

[28] Sahu B. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(1) :73-83.

[29] 李森, 夏训诚, 肖洪浪, 等. 马里萨赫勒地区风成沙特征、来源与发育时代[J]. 地理科学, 1999, 19(2): 68-75. [Li Sen, Xia Xuncheng, Xiao Honglang, et al. Characteristics, origin and development era of eolian sand in Sahelian region, Mali[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(2): 68-75.]

[30] 王立强. 河西走廊及其毗邻地区地表沉积与亚洲粉尘源区示踪[D]. 兰州:兰州大学, 2011. [Wang Liqiang. Surface Deposits of the Hexi Corridor and Its Adjacent Areas and Implications for Provenance of Asian Dust[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.]

[31] 安庆, 安萍, 徐汝汝, 等. 青藏高原不同地区沉积物的粒度特征与沉积环境判别公式适用性对比研究 [J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 37-47. [An Qing, An Ping, Xu Ruru, et al. Comparative study on grain size characteristics of sediments in different regions of the Tibetan Plateau and the applicability of sedimentary environment discriminant formulas[J]. Journal of Liaocheng University(Naturnal Science Edition), 2017, 30(4): 37-47.]

[32] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报, 1996, 1(4): 437-443. [Dong Zhibao, Chen Weinan, Dong Guangrong, et al. Influences of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1996, 15(4): 437-443.]

[33] 钱亦兵, 周华荣, 张立运, 等. 塔里木河中下游湿地及其周边土壤粒度的空间分布[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 609-613. [Qian Yibing, Zhou Huarong, Zhang Liyun, et al. Spatial distribution of soil granularity in the wetlands and their peripheral regions in the middle and lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(5): 609-613.]

[34] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120. [Gao Guanglei, Ding Guodong, Zhao Yuanyuan, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us sandland[J]. Transcation of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 115-120.]

[35] 高君亮, 高永, 罗凤敏, 等. 表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应[J]. 科技导报, 2014(25): 20-25. [Gao Junliang, Gao Yong, Luo Fengmin, et al. Response of surface soil grain size characteristics

to wind erosion desertification[J]. Scinece & Technology Review, 2014(25): 20–25.]

[36] 常兆丰, 李易珺, 张剑挥, 等. 民勤荒漠区4种植物的防风固沙功能对比分析[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 358–363. [Chang Zhaofeng, Li Yijun, Zhang Jianhui, et al. Comparison on functions of wind break and sand fixation four plant species in Minqin desert [J]. Pratacultural Science, 2012, 29(3): 358–363.]

[37] 王利兵, 胡小龙, 余伟莅, 等. 沙粒粒径组成的空间异质性及其与灌丛大小和土壤风蚀相关性分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 688–693. [Wang Libing, Hu Xiaolong, Yu Weili, et al. Spatial heterogeneity of granule diameter and its relation with shrunb size and soil erosion[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(5): 688–693.]

[38] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 64–70. [Wang Yanwu, Luo Ling, Zhang Feng, et al. Windbreak effect of sand-fixation forest on the edge of oasis in Minqin[J]. Journal of northwest Forestry University, 2018, 33(4): 64–70.]

[39] 王萍, 王燕. 民勤荒漠–绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 138–145. [Wang Ping, Wang Yan. Characteristics of aeolian sediment under different underlying surfaces in oasis-desert transitional region of Minqin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 138–145.]

[40] 赵明, 詹科杰, 杨自辉, 等. 民勤沙漠–绿洲低空沙尘暴结构特征研究[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2011, 41(2): 234–242. [Zhao Ming, Zhan Kejie, Yang Zihui, et al. Study on the structure characteristics of low altitude sandstorm in Minqin desert-oasis[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(2): 234–242.]

[41] 李耀辉, 沈洁, 赵建华, 等. 地形对民勤沙尘暴发生发展影响的模拟研究——以一次特强沙尘暴为例 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 849–860. [Li Yaohui, Shen Jie, Zhao Jianhua, et al. Simulation of terrain effect to the development of sandstrom in Minqin: Take a heavy sandstrom for example[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 849–860.]

[42] 李育, 王岳, 张成琦, 等. 干旱区内陆河流域中游地区全新世沉积相变与环境变化——以石羊河流域为例[J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1866–1880. [Li Yu, Wang Yue, Zhang Chengqi, et al. Changes of sedimentary facies and holocene environments in the middle reaches of inland rivers, arid China: A case study of the Shiyanghe River[J]. Geographical Research, 2014, 33(10): 1866–1880.]

[43] 张娅璐, 春喜, 周海军, 等. 沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 1–9. [Zhang Yalu, Chun Xi, Zhou Haijun, et al. Grain size discriminant method for eolian and lacustrine sediments of deserts and its environment indication[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 1–9.]

[44] 赵明珠, 俎瑞平, 王军战, 等. 哈罗铁路沿线沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 1–9. [Zhao Mingzhu, Zu Ruiping, Wang Junzhan, et al. Grain size characteristics of sediment along the Hami-Lop railway[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 1–9.]

[45] 杨兴华, 康永德, 周成龙, 等. 塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 167–174. [Yang Xinghua, Kang Yongde, Zhou Chenglong, et al. Characteristics of soil particle size distribution and its effect on dust emission in Taklimakan Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 167–174.]

Spatial distribution characteristics of grain size of surface soil in the sand-resitant belt of Minqin Oasis marginal

ZHAO Peng[1,2], ZHU Shujuan[1,2], DUAN Xiaofeng[2], CHANG Zhaofeng[1,2], KANG Caizhou[1], WANG Fanglin[1], WANG Yuqi[2], GAO Decai[3]

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Minqin National Field Observation & Research Station on Ecosystem of Desert Grassland, Minqin 733000, Gansu, China; 3. Gulang County Haizitan Forest Field, Gulang 733100, Gansu, China)

Abstract: Soil particle size is an important characteristic parameter of sand drift activity. Through field investigation and indoor test, this paper explored the grain size characteristics of surface soil at the windbreak and sand fixation forest with different spatial distribution, to evaluate the function of the sand barrier belt on the edge of Minqin Oasis. According to the results, the grain size composition in the surface soil of *Haloxylon ammodendron-Artemisia desertorum-Agriophyllum squarrosum* fixing forest in Baqu was mainly fine sand, medium sand, and very fine sand, which accounts for 33.47%, 26.08%, and 18.18%, respectively. The grain size composition in the surface soil of *Nitraria tangutorum-Artemisia desertorum-Bassia dasyphylla* fixing forest in Quanshanqu was dominated by fine sand, silt, and very fine sand, which accounts for 29.62%, 21.17%, and 18.87%, respectively. The grain size composition in the surface soil of *Nitraria tangutorum-Phragmites australis-Salsola collina* fixing forest in Huqu mainly consisted of fine sand, silt, and very fine sand, which accounts for 36.66%, 27.98%, and 22. 83%, respectively. Average particle size, Baqu (2.55 Φ) > Quanshanqu (3.5 Φ) > Huqu (3.94 Φ). Grain size sorting in Baqu (1.58 Φ) was poor, grain size sorting in Quanshanqu (2.29 Φ) and Huqu (2.10 Φ) were also very poor. The frequency curve of grain size in Quanshanqu and Huqu is of double peak type, while that in Baqu is of single peak type. The skewness is extremely positive, and the kurtosis is very narrow. The cumulative distribution curve of grain size shows that the aeolian sand activity in Baqu is more frequent and intense than that in the Quanshanqu and Huqu. The specie composition of the desert vegetation community determines the function of windbreak and sand fixation in the sand-blocking belt and then affects the grain size distribution of the topsoil. It suggested that forestation tree species with strong sand-fixing ability should be selected when the ecological protection system of sand-blocking belt is restored.

Keywords: sand-resitant belt; grain size characteristics; fixing vegetation; wind break and sand-fixing function; Minqin Oasis